纠缠与量子力学中测量问题的“多时空”方案

胡锦文 [1①]，胡欢 [1]
（1. 武汉大学 物理科学与技术学院，武汉 430072）

摘要：探讨了量子力学诠释中的哥本哈根解释以及“多世界”量子诠释，发现它们间可以有一种折中方案，即“多时空”方案，该方案认为，宇宙中时空可能并不是唯一的，任何系统间的相互作用都会形成一个独立的时空。这些系统在该时空中表现为“粒子”属性，而在其它无关的时空“看来”，这些系统则表现为“波动”属性。在“多时空”方案中，观察者的角色不必如哥本哈根解释中至关重要，而是被沦为了普通地位。同时论证了“多时空”方案下测量的客观性问题。“多时空”方案给量子力学中的测量问题提供了一个新的理解，但是它并未与当前的物理试验有所冲突，仍然居于量子力学的框架之内。

关键词：量子测量；哥本哈根解释；“多世界”解释；退相干；多时空

一、引言

众所周知，量子测量问题是量子力学诠释中的根本问题。为了解决这一问题，近几十年来诞生了多种版本的对量子力学解释的理论，如哥本哈根解释[1,2]、退相干解释[3]、多世界解释（及相对态解释）[4,5]、隐参量理论[6,7]、相容历史解释[8]及语义重构类解释[9,10]等等。这些解释从不同的方面来诠释量子力学所决定的微观世界为何与我们所感知的宏观经典世界明显不同这一根本问题。在这些解释中，最有影响力的是哥本哈根解释。该解释最核心的思想是波函数坍缩，即，由于外部经典世界的存在，导致微观系统的波函数发生了坍缩，而这种坍缩是一种不能为薛定谔方程所描述的非幺正的突变过程。

很显然，哥本哈根解释存在一个明显的问题，那即是，何为经典世界？微观世界与经典世界的边界如何定义？由这一问题出发，即出现了“薛定谔的猫”这一佯谬。以至最后，为了拯救这只“不死不活”的猫，在冯·诺依曼（John Von Neumann）链中，最终出现了人类（或意识），以“截断”这根链的无限延伸[2]。另一个隐藏在哥本哈根解释中的问题是，如何挑选优先基矢？

如果将退相干解释引入到哥本哈根解释，则可以很好的解决优先基矢问题，即，外部环境与稳定性判据[11,12]，使得经典性质从量子世界中构建出来。值得一提的是，量子退相干理论近几年来取得了一些了不起的成就[13-15]，其现象也被大量试验实践所证实。然而，人们也认识到，退相干理论完全居于量子力学框架之内，其仍然无法很好的解决量子测量问题[16]。原因是，（退相干后的）体系与环境作为一整体仍然处在更庞大的纯态波函数状态下。

此外，还有著名的多世界诠释[4]，其核心思想是波函数从未坍缩，而代之以每一次的观测导致世界的“分裂”。该诠释的重要意义是坚持“一元论”，且维护了决定论的思想。总而言之，量子力学的诠释目前处于一种百家争鸣的状态。随着量子理论的持续研究，这些诠释也在不断改进和完善中。值得注意的是，量子纠缠的研究在过去几十年的兴起，让人们认识到，时空几何与量子纠缠或许有着千丝万缕的联系。例如马克·范·拉姆斯登克（Mark Van Raamsdonk）等人的工作表明[17,18]，

① Email:200731890025@whu.edu.cn

时空几何是微观量子态的纠缠结构。而基于这一思想，王灿灿[19]推导出了宇宙学弗里德曼方程。受到他们这一工作和思想的启发，本文发现在哥本哈根解释与“多世界”诠释间可以有一个折中的解释，即“多时空”方案。在本文的第二节中，我们将阐述这种折中方案，以及阐述“多时空”方案对量子测量问题的理解。在本文第三节中，我们将论证在“多时空”方案下，如何保证测量的客观性。在第四节中，基于“多时空”方案对退相干解释作了一些补充。在本文的最后对全文进行了总结。

二、时空的性质与量子测量问题

在量子力学中，微观世界的运动规律服从薛定谔方程，且按照波函数决定性的演化。根据量子力学的公设，波函数服从态叠加原理，即，如果$|\phi_1\rangle$和$|\phi_2\rangle$满足运动方程，则

$$|\phi\rangle = c_1|\phi_1\rangle + c_2|\phi_2\rangle,\quad |c_1|^2 + |c_2|^2 = 1 \tag{1}$$

也是微观世界满足运动方程的可能状态。当$|\phi_1\rangle$和$|\phi_2\rangle$分别为某一个力学量的本征态时（对应的本征值为a_1和a_2），则根据波恩的几率解释，对$|\phi\rangle$测量A的可能值只能随机的得到a_1和a_2，而相应的几率为$|c_1|^2$和$|c_2|^2$。

在上述可以看到，对$|\phi\rangle$测量前后，态函数发生了截然不同的变化。测量问题是量子力学中的核心问题[20]。在正统的哥本哈根的解释中，将测量描述为如下两个原则：

（1）测量法则：可观测量由自伴算符表示，可能的观测结果（可能性的概率由概率波函数给出）是相应算符的本征值；

（2）投影假设：在不测量时，微观系统按照薛定谔方程决定性的演化（称为 U 过程）。而在测量之后，微观系统则随机的演化，态矢投影（坍缩）至相应结果的本征空间（称为 R 过程）。

很明显，“观测者”在哥本哈根解释中具有重要地位。且在波尔（Bohr）看来，“观测者”必须具有经典性质。正是根据哥本哈根这一解释，冯·诺依曼构建了“冯·诺依曼链”：如果第一个仪器D_1用量子态描述，为什么系统+仪器的复合态坍缩到$|\phi_1\rangle\otimes|D_1\rangle$？答案是因为有第二个经典仪器$D_2$的存在，使得更大的总系统坍缩到$|\phi_1\rangle\otimes|D_1\rangle\otimes|D_2\rangle$。以此类推，延伸至无穷大的宇宙——总体系，即包括系统及所有系统以外物质（仪器、观察者以及环境等等）——宇宙最后要塌缩到以下链式分支上：

$$|\phi_1\rangle\otimes|D_1\rangle\otimes|D_2\rangle\otimes|D_N\rangle\otimes|\text{Human}\rangle \tag{2}$$

式（2）中出现了目前极具争议的人类或意识。对此一些学者多有质疑[21]，认为“意识”属于形而上学，而有些学者则承认了意识的作用[22,23]。在本文，暂且不讨论意识这一非物质因素。

“冯·诺依曼链”的产生完全是在哥本哈根诠释的基础上直面“测量”这一问题的结果，而最终出现了需要人类或意识来了结链的无限延伸这一窘境，其原因中的一点，是因为哥本哈根解释坚持“只存在一个宇宙或宇宙中只存在一个时空”的思想，且该宇宙宏观上是经典的[24]。

然而，坚持“只存在一个宇宙或宇宙中只存在一个时空”的思想也许并非必要，例如“多世界诠释”是其中一种思路。“多世界”诠释坚持“一元论”的观点，认为波函数从未坍缩而永远决定性演化，观测下的波函数其各个分支都会真实“存在或出现”——对应于“多世界”的产生。在理论的思想上，“多世界”诠释最被广泛质疑的一个观点是认为其不具备简洁性。

而受到马克·范·拉姆斯登克（Mark Van Raamsdonk）等人工作的启发，本文发现在哥本哈根解释与“多世界”量子诠释之间，可以有一个折中方案的解释，即，时空可能并不是唯一的：当两个或多个系统（无论宏观还是微观的）发生相互作用，则它们间构成了一个独立的时空。在该形成的时空中，各系统均表现为“粒子”属性，而该多个系统作为一个整体，在与它们无关的时空“看来”，则表现为“波动”属性。对于不存在任何相互作用的系统，则它们不在同一个时空中。是相互作用“创造或连接”了各个独立的时空。

依据上述这样一种折中方案——“多时空”方案，再回到“冯·诺依曼链”的问题上。当采用第一个仪器 D_1 测量系统时，仪器 D_1 与系统构成了一个独立的时空「$|\phi_1\rangle\otimes|D_1\rangle$」，在该独立时空中，系统和仪器 D_1 都表现为“粒子”属性。而对于其它的仪器或人类，由于它们此时并未与仪器 D_1 及系统发生相互作用，不在它们的时空之中，因而只能“感知”到时空「$|\phi_1\rangle\otimes|D_1\rangle$」作为一个整体的“波动”属性。在“多时空”方案下，该独立的时空「$|\phi_1\rangle\otimes|D_1\rangle$」是稳定存在的，或者是稳定存在于宇宙中的，而并没必要如哥本哈根解释中需引入“人类或意识”这一因素来使得所有的仪器和系统坍缩到一个时空中①。

很显然，如果按照上述这种“多时空”方案，有读者可能就会质疑测量的客观性，即，如何保证经典仪器测量的结果与人类测量的结果的一致性（或多个经典仪器先后测量结果的一致性）？因为当多个仪器先后进行测量时，某个仪器与系统相互作用先形成一个独立的时空，此后人类或其它仪器通过测量的相互作用才“融入”这个时空或形成一个新时空。在下一节将阐述这一问题。

三、多时空方案下的测量的客观性

实际上，在“多世界”量子诠释中，孙昌璞[21, 25]等人的工作就论证过如何保证在测量导致“世界分裂”的情况下保证测量的客观性问题。他们的工作同样适用于“多时空”方案。不过需要在此基础上作一些修改和阐述。

为简单起见，假设观察者 O 通过宏观仪器 D 测量微观系统 S。首先，宏观仪器 D 测量微观系统 S，两者之间由于测量相互作用形成一个独立的时空，并且它们在该时空中均表现为经典的“粒子”属性。或者说，宏观仪器 D 和系统 S 由于相互作用都退相干到它们所形成的时空中，在该时空中形成一个经典关联：

$$\rho_{SD} = \sum |C_s|^2 |S, d_s\rangle\langle S, d_s| \tag{3}$$

其中$\{|d_s\rangle\}$是与系统基矢$|S\rangle$相对应的仪器的态基矢。由于仪器是宏观的，它对量子态反映是敏感的，因而仪器态是正交的，即$\langle d_s/d_{s'}\rangle=\delta_{ss'}$，则$\rho_{SD}$代表一种理想的经典关联。此时，如果观测的对象是系统的（厄米）力学量 A，$|S\rangle$是它的本征态，且 $A|S\rangle=a_S|S\rangle$，则系统的本征态是正交的。

紧接着，当 O 测量 D 时，观察者 O“融入”到 D 和 S 的时空中，形成一个更大的独立的时空。此时在该时空中，由于 O 也是宏观的，对量子态反映是敏感的，有$\langle O_s|O_{s'}\rangle=\delta_{ss'}$。如此则当观察者观察仪器时，仪器与观察者之间也将形成理想的经典关联：

$$\rho_{DO} = \sum |C_s|^2 |d_s, O_s\rangle\langle d_s, O_s| \tag{4}$$

其中$\{|O_s\rangle\}$是与系统基矢$|S\rangle$相对应的观察者的态基矢。这表明，观察者 O 在仪器 D 上读出了 S，且对于 a_s 的几率为$|C_S|^2$。

以上分析表明，观察者通过经典仪器 D 测量微观系统 S 的力学量 A，理想的测量（或理想的相互作用）要求三体相互作用导致的纠缠态$|\phi\rangle$是一个 GHZ 型态，即$\{|d_s\rangle\}$和$\{|O_s\rangle\}$是两个正交集。这保证了观察者和系统之间也会形成一个系数相同的理想经典关联态：

$$\rho_{SO} = \sum |C_s|^2 |S, O_s\rangle\langle S, O_s| \tag{5}$$

如果将仪器和观察者看作两个不同的观察者，则不同的观察者测量得到的结果是相同的。因而可以得出结论，测量是客观的。

从上述也可以看出，如果仪器态$|d_s\rangle$不是正交的，则仪器对系统 S 测量的结果是有可能（有一定几率）与观察者 O 对系统 S 测量的结果不同的（即，先后仪器测量的结果可能不同）。在魏格纳的朋友（Wigner's friend type）的思想试验中[26]，由于魏格纳的朋友是由大量服从量子力学的微观粒子构成的，因而可以与魏格纳和猫发生**理想的相互作用**而融入到“猫和魏格纳”形成的独立时

① 本文将“宇宙”这个代名词看作为一个居于时空之上的更大的系统。

空中，从而魏格纳和他的朋友对猫态的先后观测结果是一致的。反之，若将魏格纳的朋友换成少量服从量子力学的微观粒子的组合，则魏格纳的朋友不会与魏格纳和猫发生**理想的相互作用**，从而不能融入到"猫和魏格纳"形成的独立时空中，使得魏格纳与魏格纳的朋友间的观察结果是有可能（一定的几率）不同的。

四、退相干解释的补充

我们知道，在正统的哥本哈根诠释中，存在优先基矢问题[24]：在量子理论中，各组表象间并无本质差别，然而测量结果总是对应于一组特殊的基矢表象，例如指针向上或向下，而非其它表象。对此，瞿斯（E. Joos）和泽赫（H.D. Zeh）[3,27]提出了介由退相干过程以及稳定性判据来解决优先基矢问题。介由退相干过程的主要思想是，在与宏观环境或大量服从量子力学的微观粒子组合系统的相互作用下，体系原先具有量子相干性的波函数的不同分量间的量子相位会逐渐失去联系，转而各自同环境建立量子纠缠。而在孙昌璞[21,28]等人的工作中，则提出宏观物体的质心自由度与内部自由度内禀地耦合，产生了天然的退相干。

"多时空"方案则可以对退相干过程在诠释上作进一步补充。以两粒子的纠缠为例，两者之间的纠缠相互作用形成一个独立的时空①，虽然在其它的与此无关时空中该两粒子系统整体表现为"波动"属性（体现为量子纠缠的非定域性），然而在它们因相互作用形成的独立的时空中，两者则都表现为"粒子"的属性。因而可以间接等效的认为，独立时空的形成是系统退相干的产物，退相干后的各系统均在该时空中表现为经典的"粒子"性质——但该两粒子系统在其他的时空"看来"，则表现为"波动"性质。

在退相干诠释中，另一个重要思想则是稳定性判据，即指微观体系的一系列可能的微观状态须与宏观仪器的一系列不同的宏观状态建立稳定可靠的一一对应的关联，这种关联即使在各种复杂干扰下也不能被打乱和破坏。稳定性判据保证了微观体系具有明晰确定的且可被宏观记录和测量的微观性质。在稳定性判据的要求下，反映在"多时空"方案中，则要求相互作用形成的独立时空具有可靠的稳定性，即使有新的时空的"融入或连接"（即有新的相互作用），这种稳定性也不能被扰乱和破坏。

此外，孙昌璞等人的工作，也契合了"多时空"方案。若要描述系统集体运动模式的宏观质心自由度，必然需要指定一个特定的时空，而该时空即是该系统因内部相互作用所形成的。换言之，宏观质心的存在，必然对应于一个时空的存在，而一个时空的出现，必然对应于一些系统间存在了相互作用。系统的宏观质心与该时空（将时空等效看作一个物理实体）发生了退相干。

五、讨论与总结

波粒二象性是微观粒子的一个重要性质。然而在宏观上人类所感知到的世界却是一个经典粒子世界，即我们从未见到过一只"又死又活"的猫。在正统的哥本哈根的解释中，这一切都源于测量引起的波函数坍缩，而测量须涉及到宏观的仪器或环境。这使得在哥本哈根的解释中，外部的经典世界必不可少，而测量具有重要作用。

受到马克·范·拉姆斯登克（Mark Van Raamsdonk）等人工作的启发，本文发现在哥本哈根的解释及"多世界"量子诠释中，可以有一个折中方案，即"多时空"方案。在"多时空"方案中，波粒二象性表现为：当两个或多个系统发生理想相互作用时（无论是发生纠缠还是测量或是其它的相互作用），这些系统"构建"了一个独立的时空，在该独立的时空中，这些系统均表现为经典的粒子属性，系统与该时空（将时空等效的看作为一个物理实体）发生了退相干。而根据量子力学，

---

① 在马克·范·拉姆斯登克等人的工作中，认为时空几何是微观量子态的纠缠结构。这种观点认为时空并不是基本的。本文也是基于这一思想，认为无论是微观量子态的纠缠相互作用，还是由微观量子态组成的宏观物体间相互作用，都会产生时空结构。

该多个系统作为整体仍在一个庞大的纯态波函数状态下，反映在“多时空”方案中，即表示该多个系统作为整体在其它的无关时空看来（无关时空意指无任何**理想相互作用**的时空），则表现为“波动”属性。也可以说，由时空作为中间媒介，波粒二象性达到了辩证统一。

在“多时空”方案中，由于认为宇宙并不是只有唯一一个时空，宇宙中允许存在多个独立的稳定的时空，这使得哥本哈根解释中的观测者被沦为了普通地位，不再具有特殊性（这也是关系量子力学诠释的思想）。因为不再需要一个整体的只有一个时空的宇宙，而纠缠、测量或相互作用、坍缩、退相干则具有一个共同的产物，即它们都能“创造或连接”独立的时空。或者说，在宇宙中具有多个时空，并没有必要在“冯·诺依曼链”中引入一个最终的非物质因素（例如意识）来使得这些独立的时空通过最终“坍缩”而形成一个整体的时空。

在借鉴了“多世界”诠释领域内的一些工作后，可以证明，在“多时空”方案下，测量仍然可以保证具有客观性。而“多时空”方案与“多世界”诠释间具有一些相同和根本的不同点。相同点在于，“多世界”诠释认为在各个分页的世界中，“粒子”性才具有真实的，即测量了“薛定谔的猫”后，“死猫”和“活猫”分别在两个分页的宇宙中，并且“死猫”和“活猫”永远无法感知到对方的存在。“多时空”方案则将“粒子”性置于各个独立的时空中，时空之外其它的无关时空无法感知到它的“粒子”性。两种不同的方案都将物质的“粒子”性独立的“封闭”起来。而它们之间的不同点则是，为了维护决定论的思想，“多世界”诠释认为，波函数的每一个分支真实存在于各个对应的宇宙中，而观察者也会相应的分裂到各个宇宙中。“多时空”方案则仍然继承了哥本哈根解释的非决定论思想，以及结合了退相干解释。

值得强调的是，“多时空”方案作为一个折中方案，仍然处于量子力学的框架之内，而之所以引入了“多时空”这一方案，其目的是基于哥本哈根的解释，在“冯·诺依曼链”中去掉人类或意识这一特殊因素。而“冯·诺依曼链”可以在任何之处截断，所截断之处形成了一个独立的稳定存在的时空。“多时空”方案并没有违反任何目前已有的物理实验，仅仅是作为量子力学中关于测量问题的一种可能的理解。

参考文献

〔1〕Gomatam R. *Niels Bohr's Interpretation and the Copenhagen Interpretatio—Are the Two Inc*ompatible?[J]. Philosophy of Science, 2007(74): 736–748.

〔2〕Heisenberg W. *Physics and Philosophy*[M]. Harper, 1958.

〔3〕Joos, E., Zeh, H. D. *The Emergence of Classical Properties Through Interaction with the Environment*[J]. Z. Phys. B, 1985 (59): 223-237.

〔4〕Everett, H., *Relative State Formulation of Quantum Mechanics*[J]. Reviews of Modern Physics, 1957(29): 454–462.

〔5〕Zeh, H. D. *On the interpretation of measurement in quantum theory*[J]. Foundations of Physics, 1970, 1(1): 69-76.

〔6〕Bohm. *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden Variables'* [J]. Physical Review, 1952 (85): 166–179.

〔7〕Cushing, F. Goldstein, *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*[M]. Springer Science & Business Media, 1996.

〔8〕Griffiths, R. B. *Consistent Histories and the Interpretation of Quantum Mechanics*[J]. Journal of Statistical Physics, 1984(36): 219-228.

〔9〕Rovelli, C. *Relational Quantum Mechanics*[J]. International Journal of Theoretical Physics, 1996(35): 1637-1678.

〔10〕Born. *The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics*, Nobel Lecture. December 11, 1954.

〔11〕Zurek W. H. *Pointer Basis of Quantum Apparatus: Into What Mixture does the Wave Packet Collapse*?[J]. Phys. Rev .D, 1981(24): 1516-1523.

〔12〕Zurek W. H. *Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical*[J]. Rev.Mod. Phys., 2003(75): 715-723.

〔13〕Pernice A., Strunz W. T, *Decoherence and the nature of system-environment correlations*[J]. Phys. Rev. A, 2011(84): 062121-062129.

〔14〕Hackermuller et al. *Decoherence of Matter Waves by Thermal Emission of Radiation*[J]. Nature, 2004 (427): 711-714.

〔15〕Almeida et al. *Environment-Induced Sudden Death of Entanglement*[J]. Science, 2007, 316(5824): 579-582.

〔16〕Adler S. *Why Decoherence has not Solved the Measurement Problem: A Response to P. W. Anderson*[J]. Stud. Hist. Philos. Mod. Phys., 2003(34): 135-147.

〔17〕M. Van Raamsdonk. *Building up spacetime with quantum entanglement*[J]. Gen. Rel. Grav., 2010(42): 2323-2334.

〔18〕M. Rangamani, T. Takayanagi. Holographic entanglement entropy[J]. Lect. Notes Phys., 2017(931): 1-12.

〔19〕王灿灿.量子纠缠与宇宙学弗里德曼方程[J].物理学报, 2018(67): 19501-19512.

〔20〕Albert D. Z. *Quantum Mechanics and Experience*[M]. Harvard University Press, 2009.

〔21〕孙昌璞.量子力学诠释问题[J].物理, 2017(46): 481-496.

〔22〕Conway J. H., Kochen S. *The Strong Free will Theorem*[J]. Notices of the American Mathematical Society, 2009(56): 226–232.

〔23〕Conway J. H., Kochen S. *The Free will Theorem*[J]. Foundations of Physics, 2006(36): 1441–1473.

〔24〕唐先一, 张林志.量子力学诠释综论[J].物理学报自然辩证法通讯, 2016(38): 29-38.

〔25〕Li S W，Cai C Y，Liu X F. *Objectivity of quantum measure-ment in many-observer world*. arXiv：1508.01489，2015.

〔26〕Hugh Everett. *The Many-worlds Interpretation of Quantum Mechanics*[M]. Princeton University Press, 1973.

〔27〕Zurek W. H. *Quantum Darwinism*[J]. Nature Physics, 2009 (5): 181-188.

〔28〕Dong G H , Ma Y H , Chen J F , et al. *Decoherence of Macroscopic Objects from Relativistic Effect*[J]. Chinese Physics B, 2017(10): 27-36.